



EESTI MAAÜLIKOOL  
Tehnikainstituut

**Aleksei Heinsaar**

**KATLALABORI KÜTTESEADMETE SUITSUGAASIDE  
VÄLJATÕMBE JUHTIMINE**

**CONTROL OF FLUE GAS DRAFT OF BOILER LABORATORY  
HEAT EQUIPMENT**

Bakalaureusetöö  
Tehnika ja tehnoloogia õppekava

Juhendajad: lektor Külli Hovi, *MSc*  
lektor Mart Hovi, *MSc*

Tartu 2018



Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Aleksei Heinsaar		Õppekava: Tehnika ja tehnoloogia (384)	
Pealkiri: Katlalabori kütteseadmete suitsugaaside väljatõmbe juhtimine			
Lehekülgi: 31	Jooniseid: 11	Tabeleid: 2	Lisasid:
Osakond: Energeetika			
ETIS-e teadusvaldkond: 4.17 Energeetikaalased uuringud, CERCS: T140 Energeetika			
Juhendaja(d): Külli Hovi, <i>MSc</i> ; Mart Hovi, <i>MSc</i>			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu 2018			
<p>Eesti Maaülikooli katlalabori kütteseadmete tõhusa katsetamise ja uurimise tarbeks on vajalik, et süsteemi protsess oleks võimalikult stabiilne. Kuid tihti esineb olukorda, kus tõmme korstnas on liiga tugev, mis võib põhjustada liiga intensiivset põlemist kütteseadmetes. Tugev tõmme võib põhjustada ka liigse õhu peale voolu koldesse, mille tõttu tekib keemiliselt mittetäielik põlemine.</p> <p>Antud lõputöö eesmärk oli luua katlalaborisse süsteem millega oleks võimalik reguleerida tõmmet korstnas ning seeläbi luua paremaid tingimusi efektiivse põlemisprotsessi tarbeks. Metoodika, antud töös esineva probleemi lahenduseks, oli muuta katlalabori ruumirõhku, mille muutus kajastub ka korstna tõmbes. Ehk liiga intensiivse tõmbe korral tekitatakse ruumi alarõhk, mis omakorda pärsib tõmmet korstnas. Alarõhu tekitamiseks ruumis kasutati ventilaatorajamit, mida juhib sagedusmuundur ning selle sisse monteeritud PID-regulaator.</p> <p>Töö tulemuseks saadi rahuldava stabiilsusega protsess, mis aitab kütteseadmete põlemisprotsessi paremini jälgida ja uurida. Töös välja töötatud mudel annab võimaluse korstna rõhku muuta vastavalt soovidele. Kuna regulaatori töö võiks olla veelgi stabiilsem saab antud tööd edasi arendada eesmärgiga protsessi veelgi efektiivsemaks muuta.</p>			
Märksõnad: rõhk, tõmme, suitsugaasid, korsten, PID-regulaator			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Bachelor's Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Aleksei Heinsaar		Curriculum: Engineering	
Title: Control of Flue Gas Draft of Boiler Laboratory Heat Equipment			
Pages: 31	Figures: 11	Tables: 2	Appendixes:
Department: Energy Engineering			
Field of research: 4.17 Energetic research, CERCS: T140 Energy research			
Supervisors: Külli Hovi, <i>MSc</i> ; Mart Hovi, <i>MSc</i>			
Place and date: Tartu 2018			
<p>For the efficient testing and research in the boiler technology laboratory of the Estonian University of Life Sciences, it is necessary that the process of the system would be as stable as possible.</p> <p>However, there is often a situation where the pressure in the chimney is too strong, which causes very intense combustion in the heating system. In addition, too strong pressure can also cause situation where too much air is driven in to combustion, which causes inefficiency in burning process. The purpose of this thesis was to create a system in the boiler technology laboratory that would be able to regulate the pressure in the chimney and thereby create better conditions for an efficient combustion process.</p> <p>The methodology for solving this problem was to change the pressure in the boiler technology laboratory so that the change would also be reflected in the chimney pressure. In the case of over-intensive pressure, the under pressure of the room is caused, which in turn inhibits pressure in the chimney. A frequency converter drove the fan and PID controller mounted on it to generate the low pressure in the room. The experiment resulted in a satisfactorily stable process that would allow better monitoring and investigating the combustion process of the heating system. The design developed in the work provides the opportunity to change the chimney's pressure according to different needs. As the work of the regulator could be even more stable, this work can be further developed with the aim of making the process even more effective.</p>			
Keywords: pressure, draft, combustion gas, chimney, PID controller			

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	6
1. SUITSUGAASIDE VÄLJATÕMME .....	7
1.1 Gaaside voolamine .....	7
1.2 Tõmme.....	8
1.3 Tuule mõju tõmbele.....	9
1.4 Tõmbe reguleerimine.....	9
1.5 Tallinna Tehnikaülikooli põlemisprotsesside labor.....	10
2. TEHNIKAINSTITUUDI KATELSEADMETE ÕPPELABOR .....	12
2.1 Katelseadmete õppelabori kirjeldus.....	12
2.2 Stendide tõmme .....	12
2.3 Metoodika probleemi lahendamiseks .....	13
3. SEADMETE INSTALLATSIOON JA SEADISTUS.....	14
3.1 Seadmed .....	14
3.1.1 Ventilaatorajam .....	14
3.1.2 Sagedusmuundur .....	15
3.1.3 Muundur .....	17
3.2 Installatsioon.....	17
3.4 Sagedusmuunduri seadistus.....	18
3.4.1 Sagedusmuunduri sätteparameetrid.....	18
3.4.2 Sagedusmuunduri esmane käivitus.....	20
3.4.3 PID regulaator makro .....	20
3.4.4 Regulaatori häälestamise põhikriteeriumid .....	22
3.4.5 Ziegler-Nicholsi häälestus .....	23

4. KATSEANDMETE ANALÜÜS.....	26
4.1 Suitsugaaside juhtimise analüüs .....	26
KOKKUVÕTE .....	28
SUMMARY .....	29
KASUTATUD KIRJANDUS .....	30

## SISSEJUHATUS

Ühiskond on läbi aegade, sooja saamiseks elamutes, kui ka muude otstarvetega hoonetes, kasutanud kütteseadmeid, mis eraldavad fossiilsetest ja puitkütustest soojusenergiat. Kuid nii fossiilsetest kui ka puitkütustest eraldub põlemisprotsessi tõttu ka suitsugaasi, mis juhitakse korstna kaudu kõrgematesse atmosfääri kihtidesse. Ning seetõttu on põlemisprotsessis väga oluline roll korstna tõmbel. Sest tõmme korstnas, tõmbab ka põlemisprotsessiks vajaminevat õhku koldesse. Kui tõmme on liiga tugev võib muutuda põlemisprotsess intensiivseks ning see põhjustab omakorda liiga kõrget suitsugaasi temperatuuri. Kuna tõmme juhib ka õhku koldesse, siis võib tekkida ka vastupidine olukord, kus liigse õhu tõttu tekib keemiliselt mittetäielik põlemine. Nii keskkonnasäästmiseks kui ka soojusenergia paremaks salvestamiseks on vajadus suitsugaase paremini juhtida.

Käesoleva lõputöö teemaks on Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi katlalabori kütteseadmete suitsugaaside väljatõmbe juhtimine. Lõputöö eesmärk on luua automatiseeritud süsteem millega oleks võimalik juhtida suitsugaaside kiirust korstnas. Ning seeläbi tõhustada kütteseadmete jälgimist ja uuringuid.

Lõputöö on jaotatud nelja peatükki, millest esimeses antakse ülevaade gaaside voolamisest, tõmbe tekkimise põhimõtetest ning selle vajalikkusest. Lisaks tutvustatakse Tallinna Tehnika Ülikooli põlemisprotsesside laborit ning sealseid probleeme tõmbega. Teises peatükis kirjeldatakse Eesti Maaülikooli katlalaborit ning sealseid probleeme stendide tõmbega ning antakse ülevaade meetodikast probleemi lahendamiseks. Kolmandas peatükis tutvustatakse seadmeid ning sagedusmuunduri ja selle regulaatori seadistamis viisi. Viimases peatükis analüüsitakse katseandmeid ja välja töötatud lahendust suitsugaaside juhtimiseks.

Antud lõputöös illustreeritud jooniste koostamisel on kasutatud arvutiprogramme *AutoCAD 2017 (student version)* ja *AutoCAD Electrical 2017 (student version)*. Katseandmete analüüsimiseks ning nende graafiliseks esitlemiseks kasutati *MS Excel*-it.

# 1. SUITSUGAASIDE VÄLJATÕMME

## 1.1 Gaaside voolamine

Gaaside osakeste liikuvus on palju suurem võrreldes vedeliku osakestega. Kuid siiski saame nende käitumist kirjeldada samade füüsikaseadustega. Kuna gaaside liikuvust on küllaltki raske näha, siis on gaaside voolamist kerge ette kujutada vedelike voolamise näol.[1, 2]

Vedeliku rõhku anuma põhjapinnale saab leida valemiga[1]

$$H_{v.st} = h \cdot \gamma_v, \quad (1.1)$$

kus  $H_{v.st}$  on vedeliku staatiline rõhk  $\text{kg/m}^2$ ,

$h$  - vedelikusamba kõrgus m,

$\gamma_v$  - vedeliku mahumass  $\text{kg/m}^3$ .

Nagu teada, on soe õhk jahedast õhust kergem ning seetõttu tõuseb ta ülespoole. Gaasi voolamist põhjustab sooja ja jaheda õhu mahumassi erinevus ehk rõhk. Vedelike voolamist põhjustab aga raskusjõud ning seetõttu on rõhk palju väiksem kui raskusjõud. Gaasi voolamist põhjustavat rõhku saab arvutada valemiga[1]

$$H_g = h \cdot (\gamma_{\delta} - \gamma_g), \quad (1.2)$$

kus  $H_g$  on gaasi staatiline rõhk (nn. tõmme),

$h$  - vaadeldava gaasisamba kõrgus m,

$\gamma_g$  - kuuma gaasi mahumass,  $\text{kg/m}^3$ ,

$\gamma_{\delta}$  - ümbritseva õhu mahumass, 0 °C juures  $1,293 \text{ kg/m}^3$ .

Vanasti kasutati rõhkude mõõtmiseks vedelikmanomeetrit, milles rõhku näitab paralleelseis torudes olevate veenivoode vahe. Sellisel juhul kasutatakse gaaside rõhu mõõtmiseks millimeetrit veesammast (mm vs). Valemis 1.2 on gaasi staatilise rõhu ühikuks  $\text{kg/m}^2$ , mis ühtlasi võrdub ka mm vs. Sest  $1 \text{ kg/m}^2 = 0,1 \text{ g/cm}^2$ , mis vastab 1 mm kõrguse vedelikusamba rõhule ( $1 \text{ mm vs} = 10 \text{ Pa}$ ;  $1 \text{ mm Hg} = 13,6 \text{ Pa}$ ).[1]

## 1.2 Tõmme

Selleks, et saaks normaalselt katelt kütta on kindlasti vaja head tõmme korstnas. Eelkõige on tõmme vaja hapniku juhtimiseks kütuse juurde, kuid ka sama vajalik on kuumade suitsugaaside välja juhtimine läbi lõõristiku ning korstna kaudu. Nagu teada on põlemiseks vaja hapniku ehk on vajalik, et mingisugune teatud õhuvool oleks tagatud. Üldjuhul seda õhuvoolu põhjustab tõmme korstnas.[1]

Mida suurem on vahe kuumade suitsugaaside ja välisõhu temperatuuri vahel seda tugevam on tõmme. Loomulikult loeb ka korstna kõrgus ehk pikema korstna korral tõmme suureneb. Tõmbe suurenemist nii temperatuuri erinevusest, kui ka korstna pikkusest selgitab valem 1.2. Kuid silmas peaks pidama ka korstna sisemist takistust, mis tekib gaaside ja korstna sisemiste seinte kokkupuutel. Gaasi liikumisel torudes ja lõõrides tekitab seina ja gaasi vahel alati hõõrdetakistus, mis aeglustab voolu ja gaasi rõhku. Sellest tulenevalt saab järeldada, et mida karedamad on lõõri seinad, seda suurem on takistus. Rõhukadu ehk hõõrdetakistust mõõdetakse paskalites kanali ühe meetri pikkuse kohta ja tähistatakse  $R$  (Pa/m).[1]

Lisaks lõõrides ja korstnas tekkivale takistusele tekivad rõhukaod ka kolderestil, lõõride pöördekohtades, ristlõike muutumise kohtades, siibrite ja katlauste juures. Selleks, et põlemine koldes oleks normaalne peab korstna tõmme olema suurem kui lõõride ja katelde sisemiste takistuste summa. Korstna tõmme on võimalik ligikaudu kontrollida, kui asetada küünlaleek näiteks puhastusavade juurde. Tabelis 1 on väljatoodud ligikaudsed tõmbe tugevused vastavalt küünlaleegi asendile.[1]

**Tabel 1.** Küünlaleegi asend olenevalt tõmbest [1]

Leek	Kaldub 45°	Kõrge rõhtne	Madal rõhtne	Madal kustub mõne hetkega	Kustub kohe
Tõmme Pa	1,5	3	7	11	üle 13,5
Tõmbe hinne	nõrk	rahuldav	hea	tugev	väga tugev

Korstna normaalseks tõmbeks peetakse 7...15 Pa, mis peaks olema tagatud igasuguse ilmastiku korral[1]. Ideaalsel juhul peaks selline tõmme tagatud olema ka soojade suveilmadega, kuid tahes tahtmata võib tekkida olukord, kus enne kütmist on korstnas gaasi



temperatuur madalam, kui väljas õhu temperatuur. Sellisel juhul tekib olukord, kus tõmme korstnas puudub või puhub tupp.

### 1.3 Tuule mõju tõmbele

Tõmmet korstnas mõjutab ka tuul. Näiteks kohtades, kus tuulel puudub takistus, võib tuul tekitada korstna otsas täiendava imevõju. Arvutuslikult saab leida rõhku mida tuul avaldab ehitistele valemiga[1]

$$H = \frac{k \cdot \gamma_{\delta} \cdot v^2}{2 \cdot g}, \quad (1.3)$$

kus  $H$  on ehitistele avalduv rõhk mm vs,

$v$  – tuule kiirus m/s,

$g$  – raskuskiirendus m/s<sup>2</sup>,

$\gamma_{\delta}$  – õhumahumass kg/m<sup>3</sup>.

Valemis 1.3 antud tegur  $k$  on ühikuta suurus mis oleneb pinna paiknemisest tuule suhtes. Kuid üldjuhul korstna otsale võib teguriks võtta  $k = -0,3$ . Negatiivne märk näitab, et tuul tekitab hõrendust. Võib väita, et mida tugevam on tuul seda suurem on korstna tõmme. Kuid võib olla ka olukordi, kus takistustega häiritud tuul põhjustab keeriseid mille tõttu võib tekkida korstnas ülerõhk, mis põhjustab suitsu tagasilööke.[1]

### 1.4 Tõmbe reguleerimine

Ahju kütmisel võib tihtipeale esineda olukorda, kus tõmme on liiga tugev või vastupidi liiga nõrk. Millest tulenevalt tekib vajadus tõmmet reguleerida. Traditsioonilised viisid tõmbe reguleerimiseks on ahju välisukse, tuharuumiukse või siibri koomalelukkamisega või lahti tõmbamisega[1]. Kuid ka see ei pruugi olla piisav. Näiteks siibri koomale lükkamisega tekitame korstnalõõri kitsama ristlõike, mis põhjustab takistust ja keeriseid.

Kaubanduses saadavad tõmbemoderaator on üks vähestest lahendustest, mis vajadusel vähendab korstnalõõris tekkivat liigset tõmmet ehk rõhku. Üks sellistest tõmbemoderaator on Zugregler H+S 150, mis on saadaval hansakamin.ee kodulehel. Kaubanduses on

saadaval, ka teiste tootjate, taolist tüüpi mehaaniliselt töötavad tõmbepiirajad. Joonisel 1. on näidatud tõmbemoderaator Zugregler H+S 150.



**Joonis 1.** Tõmbemoderaator Zugregler H+S 150[3]

Tõmbemoderaator töötab automaatselt, mis avaneb, kui tõmme muutub suuremaks ette seadistatud väärtusest. Liigne tõmme ehk rõhk vähendab aga küteseadme efektiivsust. Moderaatorit on iseenesest lihtne paigaldada ja mehaaniliselt seadistada.

Tähelepanu tuleks pöörata asjaolule, et seda sorti tõmbe piiramisega juhitakse korstnasse jahedat õhku, mis liigselt suitsugaasi jahutamisel võib tekitada korstnasse pigitumist. Kogemustest on teada, et korstnapigi tekib kõrge katusega väikeelamutes, kus katusekorrust talvel ei kasutata[1]. Sellise juhul soodustab pigi teket soojustamata korstnaosa.

### **1.5 Tallinna Tehnikaülikooli põlemisprotsesside labor**

Käesoleva lõputöö raames külastati 23.03.2017 Tallinna Tehnikaülikooli Energiatehnoloogia instituudi põlemisprotsesside laborit. Külastuse eesmärk oli uurida kas

ja kuidas on lahendatud korstna tõmbega seostuvad probleemid Energiatehnoloogia instituudis asuvas põlemisprotsesside laboris.

Laborisse oli külastuse hetkeks sisse seatud kaks katsestendi. Millest üks oli gaasikatel, milles põlemisprotsess ei sõltu otseselt korstna tõmbest. Teine oli 60 kW tsirkuleeriv keevkiht katsestend, mis ehitati põlemisprotsesside ja -produktide uurimiseks. Katsestend oli põhiliselt mõeldud töötamaks põlevkiviga, kuid saab käita ka teiste madala kütteväärtusega kütustega. Katsestend võtab põlemiseks vajaliku õhu majaventilatsiooni süsteemist, mis juhitakse põlemiskambrisse suruõhuga. Lisaks on võimalik õhk segada balloonidest lämmastiku, hapniku ja süsihappegaasiga.[4]

Tõmbe juhtimine antud stendil toimub koldes, kus asuvad rõhu andurid. Kolde ülaosas hoitakse teatavat alarõhku kuni -100 kPa. Heitgaasid suunatakse välja suitsuimejaga, mis on varustatud siibriga. Siiber reguleerib ennast vastavalt rõhule. Kokku on põlemisprotsesside uurimislaboris viis moodul korstent.[4]

Kohapeal sai tehtud ka katse demonstreerimaks sealset probleemi tõmbega. Nimelt eemaldati parasjagu mitte kasutuses olevalt korstnalt puhastusluuk, millest oli näha ja tunda õhu voolu ruumi sisse. Põhjuseks peetakse sealset ventilatsiooni, mis tekitab ruumi alarõhku. Sealse tõmbe probleemiga ei oldud külastuse hetkeks veel tegeletud kuna töös olevad katsestendid ei vaja otseselt loomulikku tõmmet, vaid rõhk korstnasse tekitatakse suruõhu ja suitsuimejatega. Tõmbega seotud probleemidega on põlemisprotsesside laborantidel kindlasti plaanis tegeleda, sest plaanis on ka sinna paigaldada mitu erinevat katla katsestendi.[4]

Külastus TTÜ põlemisprotsesside laboris andis mõista, et korstna tõmbega seonduvad probleemid vajavad uurimist ja katsetamist.

## 2. TEHNIKAINSTITUUDI KATELSEADMETE ÕPPELABOR

### 2.1 Katelseadmete õppelabori kirjeldus

Katelseadmete õppelaboris, kevade 2017 seisuga, on kaks katsestendi. Üks nendest on keskküttekatel Pelle, mis on soojusliku nimivõimsusega 20 kW, mille kütuseks sobib kerge kütteõli, gaas ja puitpelletid ning korstna tõmme (pelleti põleti korral) 4 kuni 8 Pa[5]. Teiseks katsestendiks on katel LUK-50, mis on nominaalvõimsusega 50 kW, peamiselt kasutatavad kütused: halupuu, kuid sobib ka puit - ja turbabrikett, korstna minimaalne tõmme peaks olema vähemalt 25 Pa[6].

### 2.2 Stendide tõmme

Katlalaboris juhitakse suitsugaasid stendidest teras korstnasse, mis on umbes 21 meetrit kõrge. Peatükis 1.1 valemiga 1.2 kirjeldati, kuidas korstna pikkus suurendab tõmmet. Kuna katlalaboris on 21 meetrit kõrge korsten, siis sellest tulenevalt vähese tõmbega katlalaboris probleeme üldjuhul ei ole. Vaid vastupidi, tõmme on liiga tugev. Olukorda, kus tõmmet ei ole või rõhk on liiga madal, esineb ainult palavatel suveilmadel. Selline olukorda tekib tuule vaikse ilmaga, kui korstnas oleva gaasi temperatuur on välisõhu temperatuurist madalam.

Näiteks, leiame analüütiliselt rõhu korstnas, kui võtta korstna kõrguseks 21 meetrit, välisõhu temperatuuriks 0°C ja suitsugaasi temperatuuriks 150°C. Arvutamiseks kasutame valemit 1.2, mahumassid leiame Arvo Veski õpikust „Ahjud, pliidad, kaminad“ leheküljelt 36 tabel 8. Mahumassid:  $\gamma_{\delta} = 1,293 \text{ kg/m}^3$ ;  $\gamma_g = 1,086 \text{ kg/m}^3$ .

$$H_g = h \cdot (\gamma_{\delta} - \gamma_g) = 21 \cdot (1,293 - 1,086) = 4,35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 4,35 \text{ mm vs.} \quad (2.1)$$

Saadud vastus paskalitesse teisendatuna on 43,5 Pa. Tulemus näitab, et analüütiliselt leitud tõmme katlalaboris on liiga tugev. Sest normaalne tõmme katlalabori korstnas võiks olla 25 Pa,[1]. Katsestend LUK-50 tehnilistes andmetes oli minimaalseks tõmbeks korstnas märgitud 25 Pa. Ühtlasi võiks see ka maksimaalseks tõmbeks olla, sest suurema tõmbe korral võib tõusta suitsugaasi temperatuur liiga kõrgeks, põhjustades sellega liigset soojus kadu.

## 2.3 Metoodika probleemi lahendamiseks

Erinevate katelde ja kütustega katsete tegemise juures on oluline, et korstnas oleks võimaliku konstantne rõhk. See on eelkõige vajalik katelde soojusbilansi ja kasuteguri arvutamisel. On ilmne, et kui ühel katsel on korstnas tõmme 15 Pa ja teisel katsel 35 Pa, siis saame erinevad tulemused.

Probleemi võiks proovida lahendada tõmbemuunduriga, millest oli juttu peatükis 1.4. Kuid kaubanduses saadaval olevad regulaatorid ei pruugi piisavalt õhku peale anda, et tõmmet alandada neljakümnele paskalilt kahekümnele paskalile. Lisaks võib selline lahendus tekitada olukorra, kus liigse jahedaõhu korstnasse laskmisel hakkab tekkima pigi.

Katlalaboris võib tekkida vajadus katlaid katsetada ka suvel soojade ilmadega. Kuigi võiks arvata, et 21 meetrit pika moodul korstnaga ei teki kunagi tõmbe probleeme, siis nii see tegelikult ei ole. Suvel tuulevaikse ilmaga võib tekkida olukord, kus välisõhu temperatuur on suurem, kui korstna sees oleva gaasi temperatuur, mis võib põhjustada suitsugaaside ruumi sattumist. Probleemi saaks lahendada, kui abivahenditega, enne katla kütmist, korstnat seest soojendada. Selline protsess võib osutuda aga väga tülikaks, ebameeldivaks ja ka ohtlikuks.

Tulenevalt vajadusest tõmmet suurendada, kui ka vähendada, katsetatakse probleem lahendada katlalabori ruumi rõhu muutmisega. Kui on vaja tõmmet vähendada, siis alandatakse ruumis rõhku ning vajadusel tõmmet suurendada, tekitatakse ruumi ülerõhk. Ruumi rõhu muutmist teostatakse ventilaatorajamiga, mis on juba eelnevalt katlalabori välisseina installeeritud. Ventilaatorajami pöörlemiskiiruse hoidmiseks ja muutmiseks kasutatakse sagedusmuundurit, mis reageerib rõhuanduri signaal pingele. Rõhuandur on monteeritud korstnalõõri külge.

Sellise metoodika kasutamisel on peamine probleem sagedusmuunduri ja PID-regulaatori seadistamine. Protsessi juhitakse väljundi vea järgi. PID-regulaatori ülesanne on kompenseerida viga, mis tekib soovitud väärtuse ja tegeliku väärtuse vahel.

### **3. SEADMETE INSTALLATSIOON JA SEADISTUS**

#### **3.1 Seadmed**

Tegemist on seadmetega, mis vajavad töötamiseks elektrienergiat. Seetõttu tuleb tähelepanu pöörata tööohutusele. Montaaži tegemise ajal oli autor ohuteadlik isik, kes teostab montaaži töid järelevalve all. Kõik kasutatavad elektriseadmed töötavad madalapingelisel vahelduvvoolul, mis Euroopas vastavalt standardile EVS-EN 60038:2012, on 230 volti (faasijuhi ja neutraaljuhi vahel)[7]. Vahelduvvool võetakse seintesse monteeritud pistiku pesadest, seega lisa kaitselülitid ei ole vajalikud. Kasutatavad töö – ja mõõteriistad on kaitstud isolatsiooniga, tagamaks kaitset elektrilöögi eest.

##### **3.1.1 Ventilaatorajam**

Ventilaatoriga saab suletud kanalites või ruumides teisaldada gaase. Kasutusvaldkond on väga lai. Kasutatakse büroo- ja olmehoonetes, tööstusettevõtetes õhu konditsioneerimis süsteemides. Katlamajades- ja elektrijaamades saab ventilaatoreid kasutada suitsugaaside eemaldamiseks (suitsuimejad) kui ka õhu suunamiseks kütteseadmesse.[8]

Ventilaatoris muundatakse võrgust tarbitav elektrienergia gaaside kinemaatiliseks energiaks ehk liikumisenergiaks. Antud töös toimub ventilaatori õhu voo reguleerimine mootori kiiruse sagedusreguleerimisega. Nagu teada on moment võrdeline vooluhulga  $Q$  ( $m^3/s$ ) ehk gaasi kiiruse ruuduga ning mehaaniline võimsus kiiruse ja momendi korrutisega. Seega on ventilaatori mehaaniline võimsus võrdeline pöörlemiskiiruse kuubiga. Seetõttu soovitataksegi ventilaatori tootlikkuse reguleerimiseks kasutada sagedusreguleerimist.[8]

Antud töös kasutatakse aksiaalvooga ventilaatorit, mis on illustreeritud joonisel 2. Ventilaator on mootoriga ühendatud otse. Ventilaatorajami mootor on loomuliku

õhkjahutusega, mis tähendab, et ventilaatori poolt tekitatud õhuvoog jahutab ühtlasi ka mootorit.



**Joonis 3.** Katlalabori aksiaalvooga ventilaatorajam

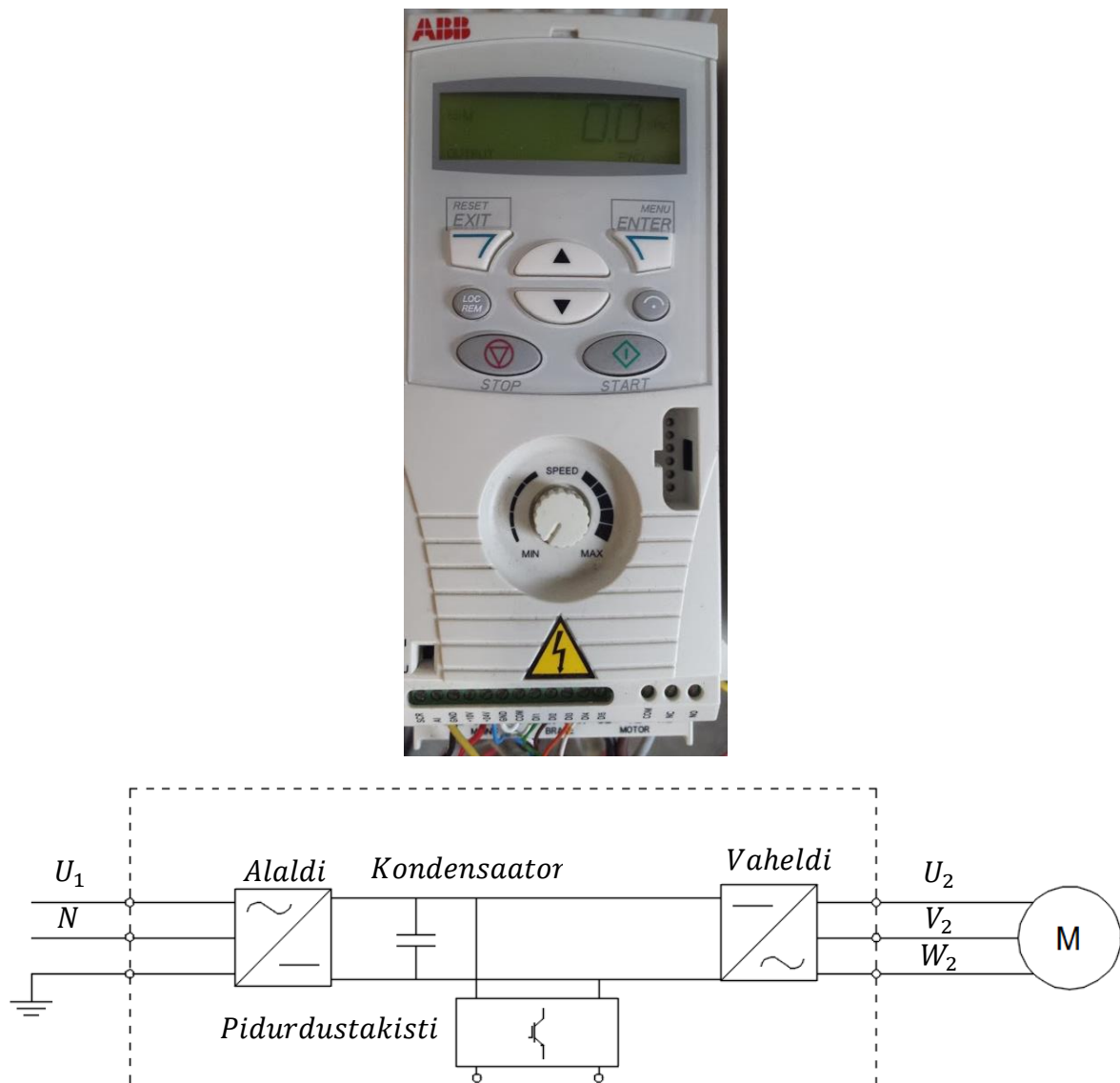
Mootori põhiandmed: kasulikvõimsus  $P = 0,15 \text{ kW}$ ; nimipinge  $U = 230 \text{ V}$ ; nimivool  $I = 0,6 \text{ A}$ ; rootori pöörlemiskiirus  $n = 1300 \text{ min}^{-1}$ . Ventilaatorajam on valmistatud 2012 aasta, mille kere kaitseaste on  $IP 65$ , isolatsiooni klass F, ajam on mõeldud töötamiseks keskkonnas, kus temperatuur on vahemikus  $-40 - +70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3.1.2 Sagedusmuundur

Sagedusmuundur kujutab terviklikku ajamiplokki, mis sisaldab toitemuundurit, andureid ja juhtseadet. Sellega on võimalik juhtida käitatavat töömasinat või tehnoloogiaprotsessi keerukat automaattalitlust. Sagedusreguleerimine on üks põhilisemaid vahelduvvoolumasinate kiiruse reguleerimis viise. Ning ka antud lõputöös kasutatakse ventilaatorajami kiiruse reguleerimiseks ABB sagedusmuundurit ACS 150. [8]

Komponentajam ACS 150 on võimsusega  $370 \text{ W}$  ning suureks plussiks on see, et saab käitada madalapingelise vahelduvvooluga  $230 \text{ V}$ . Jõuahelad on näidatud lihtsustatud joonisel 4. Sagedusmuundur koosneb mittejuhtivast dioodalaldist, juhitavast

transistorvaheldist ja alalisvoolu vahelülist, kuhu kuuluvad kondensaator, pidurdustakisti impulsslüliti. Muundur on kaitstud kestaga mille peal on olemas lülitusaparaadid. [8]



**Joonis 4.** ABB sagedusmuundur ACS150 ja selle jõuahela lihtsustatud skeem [10]

Muundurisse sisse tulev, kas kolmefaasiline või ühefaasiline vahelduvvool muundatakse alaldi kaudu alalisvooluks. Kondensaator omakorda stabiliseerib alalisvoolu ning vaheldi muundab alalisvoolu tagasi vahelduvvooluks, mis on vajalik asünkroonmootori talitluseks.[10]



### 3.1.3 Muundur

Muunduriks valiti Fläkt Woodsi kompakt kontrollerr 227VM, mis on kujutatud joonisel. Kontrollerr sisaldab dunaamilist diferentsiaal rõhuandurit, mille abil kontrollib rõhku vastavalt nii nagu kontrollerr on seadistatud. Konkreetne rõhuandur on pärit Eesti Maaülikooli Tehnikainstituudi ventilatsiooni süsteemist, kus kontrollerr reguleeris ventilatsiooni torus õhuvoolu, vajadusel siis sulgedes või avades klappi. Kontrolleri klapi reguleerimis mehhanismis tekis aga viga. Kuna vaja on mõõta rõhku korstnas ning signaal-pinge sagedusmuundurisse saata, siis sobis antud kontrollerr selleks väga hästi.



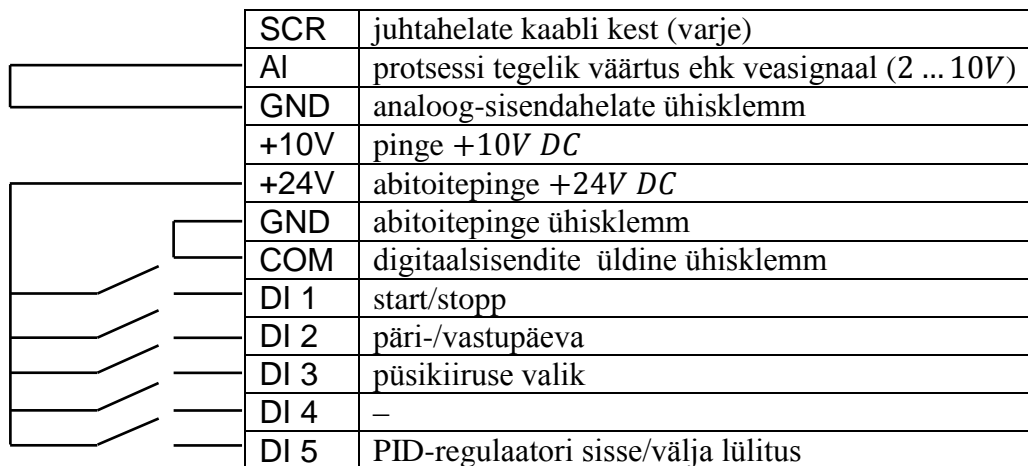
**Joonis 5.** Kompakt kontrollerr Fläkt Woods 227VM [11]

Aktuaatori kaane peal on kaks seadistus nuppu, esimesega saab väärtust valida (1) ja teisega funktsioone (2). Lisaks on kontrollerril ka kolme numbri kohaga kuvar (3) ning küljepeal diferentsiaal rõhu andur (4). Rõhuandur näitab kuvaril rõhku, kas liitrit sekundis  $l/s$  või kuupmeetrit tunnis  $m^3/h$ . Seda saab valida kui keerata väärtuse nuppu (1). [11]

### 3.2 Installatsioon

Nagu eelnevalt sai mainitud oli ventilaatorajam juba katlalabori välisseina installeeritud. Sammuti ka rõhu andurina kasutuses olev Fläkt Woodsi kompakt kontrollerr, mis oli paigutatud tõmbestendi.

Sagedusmuunduri toide võeti pistikupesast. Rõhuanduri väljund ühendati sagedusmuunduri sisendisse AI. Juhtpult sagedusmuunduri juhtimiseks ühendati vastavalt ACS150 muunduri juhendile PID regulaator makro (*PID control macro*), joonis 6.



**Joonis 6.** Sagedusmuunduri juhtpuldi ning rõhu anduri ühendusskeem

### 3.4 Sagedusmuunduri seadistus

#### 3.4.1 Sagedusmuunduri sätteparameetrid

Sagedusmuunduri sätteparameetrid saab enamasti eraldada kolme rühma:

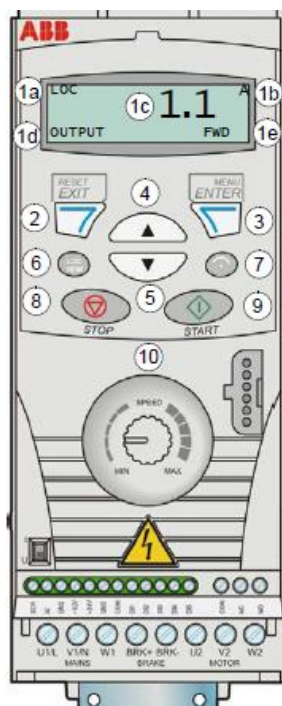
- sagedasti sätitavad parameetrid,
- harva sätitavad parameetrid,
- tootja poolt sätitavad parameetrid.

Millest kaks esimest parameetrit saab seadistada sagedusmuunduri kasutaja, tootja poolt sätitavaid parameetreid ei ole aga soovitatav ise seadistada kuna see võib muuta muunduri kasutuskõlbmatuks. Parameetreid saab sättida digitaalselt juhtpuldilt või arvutiliidese vahendusel. Antud töös kasutatud sagedusmuundurit seadistati kontroll paneelilt, mille ülevaade on toodud tabelisse 1.[8]

Muundurile on sisse programmeeritud kuus erinevat makrot. Mille valik sõltub muunduri kasutus otstarbest. Kuna antud töös oli vajalik reguleerida tõmmet sobib selleks programmiks PID kontroll makro. Mis on väga hea näiteks rõhu, taseme või voolu kontrollimiseks. [10]

**Tabel 1** Sagedusmuunduri ACS150 kontroll paneeli ülevaade, seotud joonis 7-ga.

Nr.	Kasutus
1	LCD ekraan – jagatud viieks osaks a. LOC: tähendab, et juhtimine toimub läbi kontroll paneeli REM: juhtimine puldist b. Näitab mõõtühikut c. Näitab parameetreid, signaali väärtust, menüüd, alarme ja veakoode d. Operatsiooni režiim: OUTPUT: Väljalaske režiim PAR: Parameetri režiim MENU: Menüü FAULT: Vea režiim e. Indikaatorid: FWD (päripäeva) / REV (vastupäeva): näitab mootori pöörlemise suunda SET: Saab muuta väärtust
2	RESET/EXIT – Saab väljuda menüüst ja parameetrist. Võimalik tühistada vea teateid
3	MENU/ENTER – Võimaldab siseneda menüüsse, parameetritesse. Parameetri režiimis salvestab valitud väärtuse
4	Üles – Võimaldab sirvida läbi menüü või listi, suurendab väärtust
5	Alla – Võimaldab sirvida läbi menüü või listi, kahandab väärtust
6	LOC/REM – Saab valida juhtimist, kas kontroll paneelilt või puldist
7	DIR – Vahetab mootori pöörlemise suunda
8	STOP – Seiskab ajami läbi kontroll paneeli
9	START – Käivitab ajami läbi kontroll paneeli
10	Potentsiomeeter – Muudab sagedust



**Joonis 7.** Sagedusmuunduri ACS150 kontroll paneeli ülevaade, seotud tabel 1-ga.[10]

### 3.4.2 Sagedusmuunduri esmane käivitus

Ühendades sagedusmuundur vooluvõrguga käivitub see algses režiimis (*Output mode*). Lisaks algsele režiimile on muunduril veel kaks režiimi, etalonrežiim ja parameetri režiim. Antud töö otstarbeks oli vaja kasutada põhiliselt parameeter režiimi.

Parameetri režiim jaguneb omakorda kaheks režiimiks, lühikesed parameetrid (*Short parameters mode*) ja pikad parameetrid (*Long parameters mode*). Lühikesed parameetrid on ainult sellised parameetrid, mis on vajalik muunduri alg seadistuseks, kuvaril *PAr S*. Pikas parameeter režiimis on võimalik teha peenhäälestust, kuvaril *PAr L*.

Järgnevalt on kirjeldatud, kuidas sisestada sagedusmuundurisse mootori nimiaandmed:

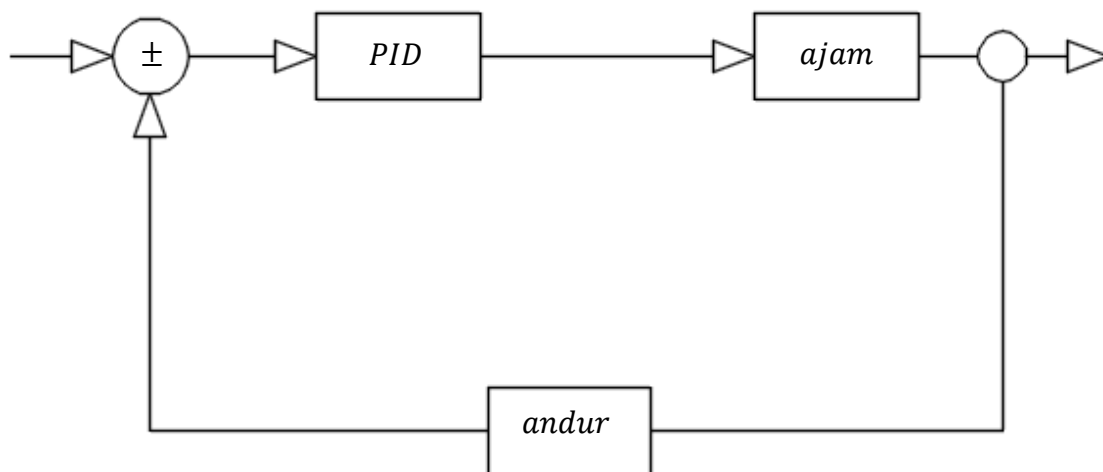
1. Esmalt tuleb valida rakenduse makro, antud töös kasutame PID kontroll makrot – selle saamiseks valime menüüst parameetri 9902 ning seejärel makro number 6.
2. Järgnevalt on vaja menüü alt valida lühikesed parameetrid (*Short parameter mode*), kuvarile peab ilmuma kiri *PAr S*.
3. Sisestame mootori nimiaandmed:
  - mootori nimipinge (parameeter 9905 *MOTOR NOM VOLT*)
  - mootori nimivool, lubatud vahemik:  $0,2 \dots 2,0 \cdot I_{2N}A$  (parameeter 9906 *MOTOR NOM CURR*)
  - mootori nimisagedus (parameeter 9907 *MOTOR NOM FREQ*)[10]

Mootori nimiaandmete sisestamisel on väga olulised täpsed andmed, sest valede andmete sisse kandmine võib põhjustada häireid sagedusmuunduri töös.

### 3.4.3 PID regulaator makro

Sagedusmuundurisse on sisse ehitatud PID regulaator, mis juhib protsessi proportsionaalselt-integreerivalt-diferentsiaalselt (*proportional-integral-derivative*). Selline juhtimine võimaldab kombineerida juhttoimet võrdeliselt veasignaale, selle integraalile ja/või tuletisele. Regulaatorit on võimalik kasutada ka kolmel erineval viisil, proportsionaalselt, integraalselt ja diferentsiaalselt, mida tähistatakse vastavalt P, I ja D. Kuid enamasti on levinud kombineeritud regulaatorid PI, PD ja PID. Antud töös kasutati PID regulaatorit. [8]

Järgnevalt on kirjeldatud, kuidas seadistada PID regulaator nii, et see juhiks protsessi rõhu andurist tulev signaalpinge järgi, seda protsessi illustreerib ka joonis 8:



**Joonis 8.** PID regulaator protsessi konfiguratsioon

1. 9902 rakenduse makro: esiteks tuleb valida rakendus makro number 6 (PID regulaator).
2. 4010 PID regulaatori juhtimise valik: selle parameetri alt tuleb valida viis kuidas hakatakse PID regulaatorit juhtima, antud juhul valiti selleks 1, mis tähendab, et juhtimine toimub analoog sisend AI 1 kaudu. Lisaks saab valida ka ühikut (4006 UNITS) ja selle skaalat (4007 UNIT SCALE). Vaikimisi on ühikuks protsent, mis antud juhul jäeti muutmata.
3. 4014 tagasiside valik ja 4016 ACT1 sisend: parameeter 4014 määrab kust võetakse tagasiside signaal, vaikimisi on selleks ACT1, muunduris tähistatakse number 1-ga. Parameeter 4016 määrab mille kaudu käib juhtimine, vaikimisi analoog sisend AI1, mis antud juhul sobis.
4. 4018 ACT1 miinimum ja 4019 ACT1 maksimum: parameeter 4018 määrab miinimum väärtuse ACT1 jaoks ning parameeter 4019 määrab maksimum väärtuse ACT1 jaoks. Kuna juhtimine käib analoog sisendi kaudu, on parameetrid 4018 ja 4019 seotud parameetritega 1301 ja 1302. Parameeter 1301 määrab miinimum väärtuse millele muundur reageerib. Kuna rõhuandur väljastab kuni 10 V ning soovitud rõhk korstnas peaks olema 20 Pa, mis võrdub ligikaudu 2,8 V, siis tuleb

parameeter seadistada 28%. Parameeter 1302 määrab maksimum väärtuse milleks seadistati 29% ehk 2,9 V.

5. 4001 võimendustegur (*gain*),  $K_p$ : parameeter 4001 määrab tõusu PID regulaatori protsessi jaoks, ehk kas väljundi viga likvideeritakse järsult või sujuvalt. Tähelepanu tuleks pöörata asjaolule, et liiga suur võimendustegur võib põhjustada võnkumist. Võimendustegurit saab valida vahemikus 0,1 ... 100.
6. 4002 integraali aeg (*integration time*),  $T_i$ : parameeter 4002 määrab millisel kiirusel parandatakse väljundi viga. Oluline on teada, et mida lühem on integratsiooni aeg seda kiiremini parandatakse väljundi viga, kuid liiga lühike integratsiooni aeg muudab regulaatori ebastabiilseks. Vaikimisi on integratsiooni aeg seadistatud 60 sekundi peale. Kui integratsiooni ajaks valida 0 sekundit, siis on integratsiooni funktsioon regulaatorist välja lülitatud.
7. 4003 tuletise aeg (*derivation time*),  $T_d$ : parameeter 4003 muudab regulaatori tundlikumaks häirete suhtes.

### 3.4.4 Regulaatori häälestamise põhikriteeriumid

Kõige olulisem eesmärk regulaatori häälestamise juures on saavutada süsteem, mis reageeriks häiretele/muutustele võimalikult kiiresti ning rahuldava stabiilsusega. Sest liiga stabiilne regulaator reageerib häiretele liiga aeglaselt. Kuid samas mittestabiilne regulaator võib reageerida väga kiiresti mille tulemusena muutub protsess ebastabiilseks. Ehk need kaks kriteeriumit kiire reageerimine ja rahuldav stabiilsus on kõige olulisemad regulaatori häälestamise juures. Ning rahuldava protsessi loomiseks tuleks leida kesktee põhikriteeriumite vahel. [12]

Finn Haugeni raamatus „*PID Control*“ lk 33 on PID regulaatorit kirjeldatud järgneva valemiga

$$u = u_0 + \underbrace{K_p e}_{u_p} + \underbrace{\frac{K_p}{T_i} \int_0^t e d\tau}_{u_i} + \underbrace{K_p T_d \frac{de}{dt}}_{u_d}, \quad (3.1)$$

kus  $K_p$  on proportsionaalse regulaatori võimendustegur,

$e$  – seadesignaali ja tagasisidesignaali vahe ehk veasignaali,

$T_i$  – integraali aeg, s,

$T_d$  – tuletise aeg, s.

Valemis 4.1 tähistab  $u_p$  P-regulaatorit,  $u_i$  I-regulaatorit ja  $u_d$  D-regulaatorit. Antud valemit võib teisiti kirjeldada järgnevalt:

$$u = u_0 + u_p + u_i + u_d, \quad (3.2)$$

kus  $u$  on protsessi sisendsignaali ning  $u_0$  on vajaminev signaal millega hoitakse protsessi soovitud väärtuse juures. Seda punkti saab leida, kui regulaator on manuaalsel režiimil.

Regulaatori häälestamiseks on Finn Haugen oma raamatus „*PID Control*“ välja toonud mitu erinevat häälestus viisi: P-I-D eksperimentaalne häälestus (*The P-I-D method*), Ziegler-Nicholsi häälestus (*Ziegler-Nichols' closed loop method*) ja Åström-Hägglundsi häälestus (*Åström-Hägglund's On/off method*). Antud lõputöö tarbeks katsetati regulaatorile sobivaid parameetreid leida proovimise teel ning katsetati ka Ziegler-Nicholsi häälestust. [12]

### 3.4.5 Ziegler-Nicholsi häälestus

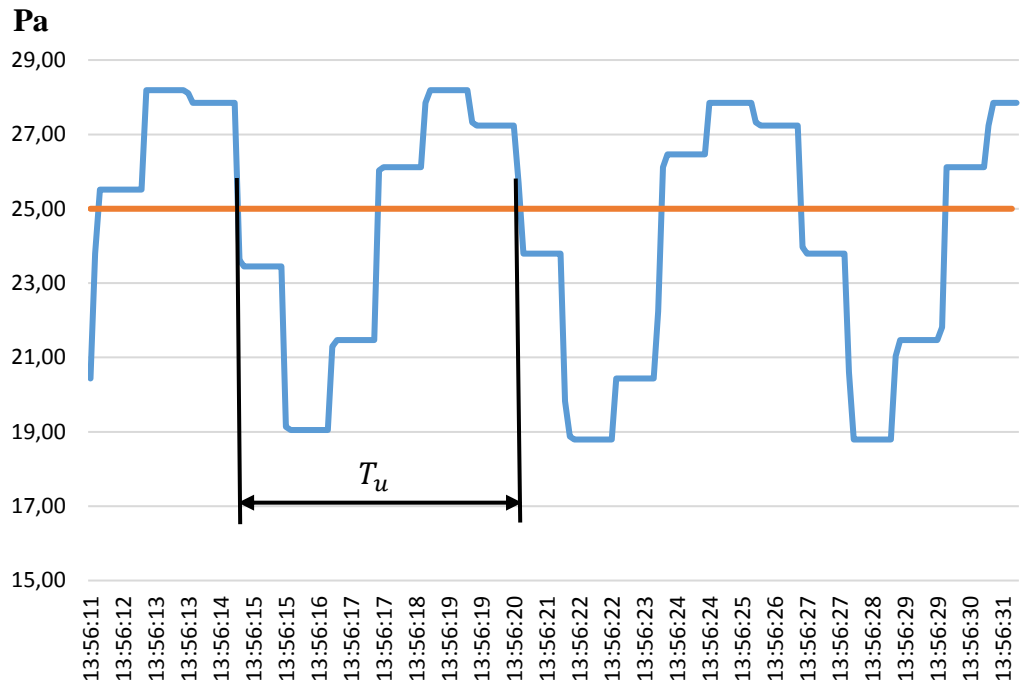
Selle meetodi rajasid John G. Ziegler ja Nathaniel B. Nichols aastatel 1942-1943 ning, mis on mõeldud P-, PI- ja PID regulaatorite häälestuseks. Õigeks häälestuseks on vajalik valida võimalikult täpsed võimendustegurid. P-regulaatori võimendusteguriks on  $K_p$ , I-regulaatori võimendustegur  $K_i$  ning D-regulaatori tegur  $K_d$ . Antud lõputöös kasutatud PID regulaatoril on võimendustegurite asemel kasutatud ajakonstante, I-regulaatori ajakonstant  $T_i$  ning D-regulaatori ajakonstant  $T_d$ . [12]

Järgnevalt on kirjeldatud kuidas seadistati antud lõputöös PID regulaatorit Ziegler-Nicholsi meetodiga:

1. Esmalt lülitati välja I- ja D-regulaatorid. Selleks oli vajalik seadistada parameetrid 4001 ja 4002 null sekundi peale. Nüüd toimis regulaator ainult proportsionaalsena. Ziegler-Nicholsi meetod ütleb, et alguses tuleks võimendustegur  $K_p$  väärtuseks valida null.
2. Järgnevalt hakati võimendusteguri  $K_p$  väärtust vähe haaval tõstma ja seda tehti kuni saavutati siinuskõvera taoline võnkumine, protsessi kirjeldab joonis 9. Võimendusteguri  $K_p$  väärtust, millega saavutati siinuseline võnkumine, nimetatakse stabiilsuspiirile vastavaks võimendusteguriks,  $K_{pu}$  (*ultimate gain*)[8].

Ziegler-Nicholsi meetodit kasutades on oluline, et  $K_{pu}$  väärtus oleks minimaalne millega siinuseline võnge tekib.

3. PID regulaatori väärtuste arvutamiseks on vajalik võnkumiste perioodi  $T_u$  (*ultimate period*). Mõõdeti võnkumiste periood  $T_u = 6s$ , mis on näidatud joonisel 9.



**Joonis 9.** Võnkumiste perioodi  $T_u$  leidmine (vertikaalne joon näitab soovitud rõhku ning perioodiline signaal näitab tegeliku rõhku)

4. Vastavalt Ziegler-Nicholsi algoritmile leiti regulaatorile parameetrid. Arvutuste tegemiseks kasutati valemeid, mis on välja toodud tabel 2-s.

**Tabel 2.** Ziegler-Nicholsi valemid regulaatori parameetrite arvutamiseks [12]

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P-regulaator	$0,5K_{pu}$	0	0
PI-regulaator	$0,45K_{pu}$	$T_u/1,2$	0
PID-regulaator	$0,6K_{pu}$	$T_u/2$	$T_u/8 = T_i/4$

Kuna protsessis kasutati PID regulaatorit, siis arvutusteks kasutati tabel 2. kolmanda rea valemeid.



Järgnevalt arvutati parameetrid  $K_p$ ,  $T_i$  ja  $T_d$ :

Proportsionaalse võimenduse tegur

$$K_p = 0,6K_{pu} = 0,6 \cdot 1 = 0,6, \quad (3.3)$$

kus  $K_{pu}$  on stabiilsuspiirile vastav võimendustegur (*ultimate gain*).

Integraali aeg

$$T_i = \frac{T_u}{2} = \frac{6}{2} = 3s, \quad (3.4)$$

kus  $T_u$  on võnkumiste periood (*ultimate period*).

Ning tuletise aeg

$$T_d = \frac{T_u}{8} = \frac{6}{8} = 0,75s, \quad (3.5)$$

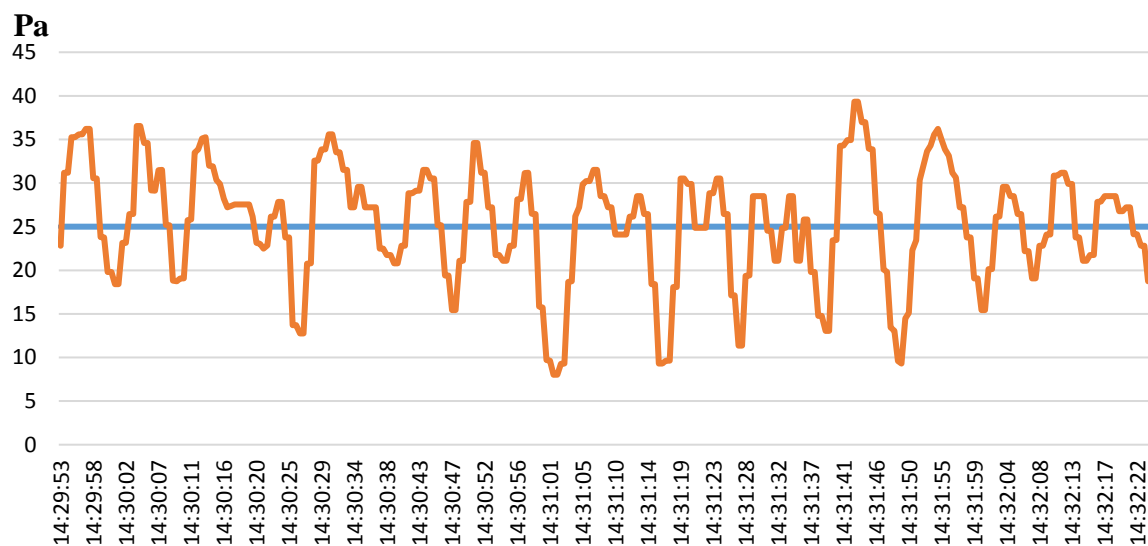
Vastavalt saadud tulemustele seadistati PID regulaator. Arvutatud parameetritega protsess on kajastatud joonisel 11.

Juhul, kui selline häälestusmeetod ei anna soovitud tulemust, siis on soovitatav vähendada võimendusteguri  $K_p$  väärtust näiteks 5-10%. Kuid tihtipeale ei anna see meetod kohest tulemust ning tõenäoliselt tuleb ka teisi võimendustegureid või ajakonstante muuta. Aga Ziegler-Nicholsi meetod peaks andma hea lähtekoha ning parameetrid, rahuldava protsessi loomiseks, ei tohiks väga palju erineda arvutatud väärtustest. [12]

## 4. KATSEANDMETE ANALÜÜS

### 4.1 Suitsugaaside juhtimise analüüs

Esimeses seadistuse etapis katsetati regulaatorit seadistada suhteliselt suvaliste parameetritega. Sellist viisi kasutades saadi esmane ülevaade regulaatori tööst. Joonisel 10 on näha suvliste parameetritega PID regulaatori töö.

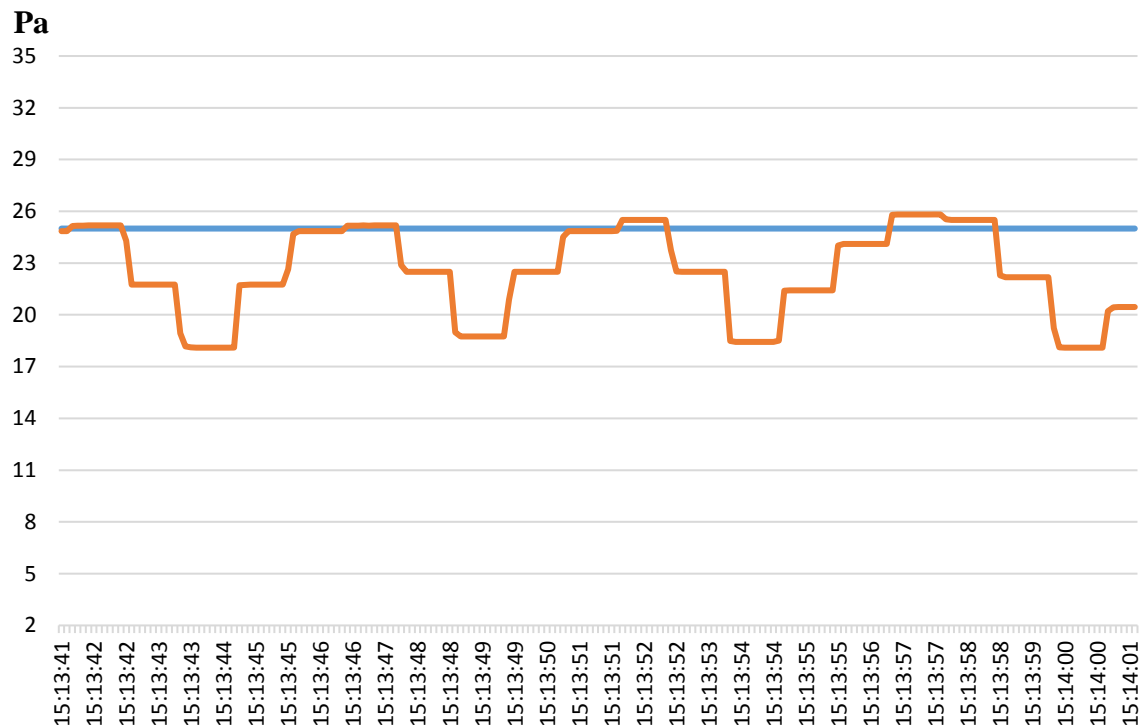


**Joonis 10.** PID regulaatori töö suvaliste paameetritega (horisontaalne joon tähistab soovivat rõhku korstnas, ebastabiilne signaal näitab tegeliku rõhku korstnas)

Jooniselt 10 on näha, et protsess on kaootiline ning regulaatori töös ei ole stabiilsust. Kohati langeb rõhk 8 paskali peale ning samas tõuseb ligi 40 paskalini. Sellist protsessi põhjustab liiga suur võimendusteguri valik, kui ka vale integraali ja tuletise aeg.

Selleks et regulaatori tööd parandada on soovitatav kasutada välja töötatud regulaatori häälestus meetodeid. Kuigi need meetodid ei pruugi koheselt rahuldava stabiilsusega süsteemi luua. On need siiski head lähte parameetrite loomiseks, kust saab häälestusega edasi minna. Antud lõputöös otsustati katsetada ühte kõige tuntumat PID regulaatori häälestust ehk Ziegler-Nicholsi meetod.

Joonisel 11 on näha regulaatori tööd uute parameetritega. Lihtsasti on märgatav, et regulaator on käituma hakanud stabiilsemalt. Küll mitte nii stabiilselt, kui ideaal mudel ette näeb, võib siiski saadud tulemusega rahule jääda. Rõhk korstnas kõigub umbes 6 paskalit, kui võrrelda seda joonis 10 oleva protsessiga, kus rõhk kõikus kohati 17 paskalit, siis võib väita et protsessi on parandatud ligemale kaks korda.



**Joonis 11.** PID regulaatori töö pärast Ziegler-Nicholsi meetodit kasutades (horisontaalne joon tähistab soovitud rõhku, siinuseline signaal näitab tegeliku rõhku)

Oluline on vaadata ka mudelit mida reguleeritakse. Nimelt on tegemist põlemisprotsessiga kütteseadmes ning autor arvab, et 6 paskaline kõikumine põlemisprotsessi jälgimist väga ei häiri.

Võib väita, et saadud tulemus on rahuldava stabiilsusega ning esialgu ei hakatud PID-regulaatori tööd rohkem muutma. Kuid plaanis on kindlasti ka edaspidi antud protsessi kallal töötada, eesmärgiga see võimalikult stabiilseks luua.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärk oli luua Eesti Maaülikooli katlalaborisse automatiseeritud süsteem millega oleks võimalik reguleerida tõmmet korstnas ning seeläbi luua paremaid tingimusi kütteseadmete efektiivsemaks uurimiseks. Probleemi lahenduseks katsetati muuta katlalabori ruumirõhku, mille muutus kajastuks ka korstna tõmbes. Selleks pandi kokku automatiseeritud süsteem, mis koosnes ventilaatorajamist, rõhuandurist, sagedusmuundurist ning selle sisse monteeritud PID-regulaatorist. Kuna PID-regulaatori häälestus võib kohati olla küllaltki keeruline ning aeganõudev, siis toodi töös mõned näited, kuidas regulaatorit häälestada.

Lõpptulemuseks loodi protsess, mis on võimeline korstna rõhku hoidma enam vähem soovitud väärtuse juures. Protsess kõigub umbes pluss miinus kuus paskalit, mis ei ole küll ideaalne tulemus, kuid antud töös pakub selline süsteem rahuldavat stabiilsust. Ning oluline on vaadata ka mudelit või süsteemi tervikuna mida reguleeritakse. Kuna katlalaboris uuritakse põhiliselt kütteseadmeid, mida käitatakse fossiilsete või puitkütustega, siis võib väita, et põlemisprotsess kütteseadmetes on küllaltki aeglane. Ning seetõttu kuue paskaline kõikumine uurimistulemusi väga ei mõjuta. Võttes arvesse eelpool mainitud võib lõpptulemusega rahule jääda ning püstitatud eesmärgid täidetuks lugeda.

Töös kasutatud meetoodika tõmbe reguleerimiseks andis head lähte parameetrid, kust seadistamisega edasi minna. Autor soovib jätkata töös esitletud süsteemi edasi arendamist ning soovib taolise süsteemi kasutamise juures tähelepanu pöörata, et iga süsteem ja selle protsess on isemoodi. PID-regulaatoreid kasutatakse tänapäeval enamus automaatika juhtimiseks ning seetõtt on seadistamise viise väga palju. Tööd oleks vaja ka edasi arendada ja töötada välja meetoodika, mis vajadusel tõmmet forsseeriks.

## SUMMARY

The aim of this thesis was to create an automated system for the Estonian University of Life Sciences boiler technology laboratory, which would be able to regulate the flow in the chimney and thereby create better conditions for more efficient research related to the heating devices. In order to solve the problem, it was attempted to change the space pressure of the boiler technology laboratory so that the change would also be reflected in the chimney flow. For this purpose, an automated system was put together consisting of a fan drive, a pressure sensor and a frequency converter with a PID controller. As the adjustment of the PID controller is quite complicated and time-consuming, the author presented some examples of how to adjust the regulator.

As a result, a process was created that is able to keep the chimney pressure more or less at the desired value. The process fluctuates around plus/minus six Pascal's, which is not the perfect result, but in the context of this thesis gives satisfactory stability. It is important to keep in mind that there is a need to look at the regulated model or system as a whole. In the boiler technology laboratory the research focuses mainly on the heating devices operated with fossil or wood fuels and therefore, it could be argued that the combustion process in heating systems is rather slow. Consequently, the six Pascal fluctuations do not affect much the research results. Taking into account the above-mentioned, the final result can be considered as satisfactory and the objectives of this thesis are fulfilled.

The methodology used to regulate the flow gave good starting parameters from where to proceed with the setup. The author wishes to continue developing the system presented in the work and suggests keeping in mind that while using such a system one needs to pay attention to the fact that each system and its process of work are different. Nowadays, PID controllers are used for controlling most of the automatic systems, and there are many different ways to set up. There are many possibilities on how to further develop the research and there is a clear need to develop a methodology that could increase the tension.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Veski, A.** (2005) Ahjud, pliidad, kaminad. Tallinn: Tormikiri OÜ. 212 lk.
2. **Mättas, L.** (1984) Füüsika *Ettevalmistusosakonnale*. Mehaanika 3. ja 4. peatükk. Tartu: EPA rotaprint. 96 lk.
3. Tõmberegulaator Zugregler H+S 150. <http://hansakamin.ee/est/tooted/tarvikud-ja-aksessuaarid/korstna-tomberegulaator-zugregler-h-s-150/>. [on-line] Hansakamin OÜ. (28.06.17).
4. **Konist, A.** (27. märts 2017). TTÜ Energiatehnoloogia instituudi põlemisprotsesside laborist. Aleksei Heinsaar intervjuu. Üleskirjutis/helisalvestis. Tallinn.
5. Viljandi Metall. Keskküttekatel Pelle Paigaldus -ja kasutusjuhend. [http://www.vmt.ee/images/Pelle\\_Paigaldus\\_ja\\_kasutusjuhend.pdf](http://www.vmt.ee/images/Pelle_Paigaldus_ja_kasutusjuhend.pdf). [on-line](28.06.17).
6. Rapla Metall. Katel LUK-50 andmed. <http://www.raplametall.ee/et/tooted/halupuukatlad/katel-luk-25-50>. [on-line](28.06.17).
7. Eesti Standardikeskus. CENELECi standardpinged. <https://www.evs.ee/tooted/evs-en-60038-2012>. [on-line](04.07.17).
8. **Lehtla, T.** (2007) Elektriajamid. TTÜ elektriajamite ja jõuelektroonika instituut. Tallinn. 202 lk.
9. ABB Oy. Sagedusmuundur ACS150 <http://new.abb.com/drives/low-voltage-ac/micro/acs150> .[on-line](10.01.18).
10. ABB Oy. ABB component drives ACS150 users manual. Helsinki. 168 lk.
11. Fläkt Woods. Compact controller 227VM users manual. 11 lk. <http://resources.flaktwoods.com/Perfion/File.aspx?id=a4ec9fc6-dd52-49e6-9153-aecbf0ad39d4>. [on-line](11.01.18).
12. **Haugen, F.** (2004) PID Control. Tapir Academic Press, Trondheim. 293 lk.

Mina, \_\_\_\_\_,  
(*autori nimi*)

sünniaeg \_\_\_\_\_,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_,  
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on \_\_\_\_\_,  
(*juhendaja(te) nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_  
(*allkiri*)

Tartu, \_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)

---

### **Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_  
(*juhendaja nimi ja allkiri*)

\_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)

\_\_\_\_\_  
(*juhendaja nimi ja allkiri*)

\_\_\_\_\_  
(*kuupäev*)